



Análisis de diagramas de flexocompresión biaxial y momento-curvatura para secciones de concreto armado utilizando el método de fibras

Marco Cevallos¹ 

¹Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador

Recepción: 09/01/2025

Aceptación: 03/12/2025

Publicación: 29/12/2025

Correspondencia: cevallosmarco4@gmail.com

Resumen

El diseño de columnas y muros estructurales sometidos a cargas axiales y momentos flexionantes es laborioso y propenso a errores. Para superar estas limitaciones, se han implementado métodos numéricos programables en lenguajes de programación comerciales. El propósito del estudio es analizar el comportamiento a flexocompresión de secciones de concreto armado mediante el método de fibras. Se llevaron a cabo simulaciones computacionales en MATLAB, donde se implementaron las curvas de tensión – deformación de Mander para el concreto y Park para el acero, además de incluir curvas o modelos simplificados como el modelo bilineal del acero y el rectángulo de Whitney del concreto. Los resultados obtenidos mediante modelos constitutivos de materiales avanzados describen mejor el comportamiento real de las secciones de concreto armado que los modelos de diseño simplificados.

Palabras clave: Flexocompresión. Concreto armado. Diseño estructural.

Abstract

The design of structural columns and walls subjected to axial loads and bending moments is a complex process prone to errors. To address these challenges, programmable numerical methods have been implemented using commercial programming languages. This study aims to analyze the flexural-compression behavior of reinforced concrete sections through the fiber method. Computational simulations were conducted using MATLAB, incorporating Mander's stress-strain curves for concrete and Park's model for steel, as well as simplified models such as the bilinear steel model and Whitney's rectangular stress block for concrete. The results demonstrate that advanced material constitutive models more accurately represent the actual behavior of reinforced concrete sections compared to simplified design models.

Keywords: Flexural compression. Reinforced concrete. Structural design.

Introducción

Generalmente, los cálculos más laboriosos para los que diseñan estructuras de concreto son los que concierne al diseño de columnas y muros estructurales gracias a la acción simultánea de cargas axiales y momentos de flexión sobre los elementos (flexo-compresión), por lo que el análisis y diseño de los elementos se ha efectuado a través de la elaboración de diagramas de manera tradicional considerando modelos simplificados del comportamiento real de los materiales.

El modelo constitutivo es un modelo matemático-mecánico que describe la idea de un estado de tensión-deformación de un material, por lo que la ley de definición matemática modela el comportamiento físico idealizado. Así, la validez del modelo constitutivo depende del nivel de comprensión del modelo físico y de la aproximación mecánica numérica para la cual se presenta su simulación. No es fácil formular una ley definida que pueda usarse para reproducir el comportamiento de cualquier material ni una ley rectora que cubra todos los rangos y modos posibles de excitación y comportamiento de un material en particular, pero si existen principios (Luccioni, 1993).

Los modelos constitutivos más avanzados como los propuestos por Mander (concreto) y Park (acero) describen mejor el comportamiento real no lineal de las secciones de concreto armado que los modelos de diseño simplificados. Estos modelos integran variables presentes en condiciones reales, como el confinamiento de la sección y el endurecimiento del acero en su rango plástico, lo que permite una evaluación más realista del desempeño estructural. Por otro lado, modelos como bilineal del acero y el rectángulo de Whitney presentan mayor facilidad y menor tiempo de cálculo cuando se busca diseñar secciones de hormigón armado los cuales representaban una gran ayuda cuando se debía realizar estos cálculos de forma manual, sin embargo, actualmente se puede implementar estos cálculos en modelos computacionales reduciendo los tiempos de trabajo, adicionalmente estos modelos no representan adecuadamente el comportamiento real de una sección de hormigón armado.

Como menciona Briones (2020), la distribución real de esfuerzos en una sección tiene una forma parabólica, sin embargo, Whitney propuso que se asuma esta forma como un bloque rectangular equivalente con el objetivo de simplificar cálculos, por otro lado, el modelo propuesto por Mander et al. (1988), es un modelo no lineal de confinamiento constante y se basa en una ecuación simple que relaciona la tensión y la deformación, y se aplica a la carga de compresión

uniaxial en el hormigón, así como al confinamiento proporcionado por cualquier tipo de refuerzo transversal, cuya influencia de este confinamiento se tiene en cuenta por medio de una tensión de confinamiento lateral efectiva, que depende de la configuración del refuerzo transversal y longitudinal.

El modelo elastoplástico perfecto del acero es un modelo simplificado que supone que los esfuerzos de tensión del acero se mantienen constantes para cualquier deformación superior a la deformación de fluencia del acero, es decir, no considera ninguna perdida de rigidez del material. Adicionalmente, Medina (2015) menciona que el modelo constitutivo de Park considera una zona de endurecimiento del material post fluencia.

El método numérico propuesto en esta investigación corresponde al método de fibras. Marín (2009) señala que, el método de fibras es aplicado para analizar la sección transversal de un objeto, en la cual se divide la sección en pequeñas fibras de igual tamaño, con sus propias propiedades mecánicas.

El comportamiento a flexión y compresión de las secciones serán evaluados mediante diagramas de flexocompresión y diagramas de momento-curvatura. Muñoz (2020) señala que, los diagramas de interacción proporcionan información detallada sobre las diferentes combinaciones de carga axial, P , y momento flexionante, M , que una sección transversal determinada resistir. A su vez, la gráfica de momento curvatura de una sección indica la relación entre el momento flector resistente con la curvatura de la misma, para Mora & Aguiar (2018) indica que, el gráfico de curvatura de momento le permite conocer la ductilidad de la sección, que es la capacidad de caer en el rango no lineal antes de que ocurra la falla.

Los diagramas mencionados serán desarrollados en MATLAB, un entorno de programación y lenguaje de alto nivel. Estos diagramas fueron construidos considerando en el Teorema de Navier el cual establece que las secciones planas permanecen planas antes y después de la deformación. Este supuesto permite simplificar el cálculo de las deformaciones unitarias en las fibras de la sección transversal. Adicionalmente, se considera que la fuerza es directamente proporcional al esfuerzo y el área de la sección.

La presente investigación tiene como objetivo analizar el comportamiento a flexión y compresión de secciones de concreto armado a través del desarrollo de diagramas de interacción y momento curvatura y, además, se busca evaluar cómo variables significativas influyen en la capacidad y ductilidad de los elementos estructurales.

Métodos

El presente estudio corresponde a una investigación descriptiva, con un enfoque numérico y computacional. Se implementó un modelo matemático basado en el método de fibras para analizar el comportamiento a flexión y compresión de secciones de hormigón armado. El método propuesto facilita la obtención de los diagramas de interacción y momento-curvatura, considerando el equilibrio estático. Como principio fundamental, se adoptó el Teorema de Navier.

La deformación unitaria en una fibra se obtiene considerando una distribución lineal de las deformaciones de cada fibra en función de la profundidad del eje neutro.

Para cada fibra, se asume que el esfuerzo está directamente relacionado con la deformación unitaria a través de las curvas constitutivas de los materiales. Adicionalmente, se considera que la fuerza es directamente proporcional al esfuerzo y el área. $F = \sigma * A$.

Donde:

- σ : Esfuerzo en la fibra.
- F : Fuerza interna.
- A : Área de la fibra.

Esta relación es válida para un rango de deformaciones pequeño, facilitando la implementación numérica, para el efecto, se desarrolló el siguiente procedimiento:

1. Discretización de la sección transversal:

- La sección de hormigón armado se divide en fibras rectangulares de áreas pequeñas.
- Cada fibra se caracteriza según su material constitutivo: hormigón confinado, hormigón no confinado o acero de refuerzo.
- La cantidad de fibras se define para asegurar la convergencia numérica del método, evaluando posteriormente su influencia en los resultados.

2. Cálculo de deformaciones:

- Se define un vector de deformaciones unitarias aplicando el Teorema de Navier.
- La deformación en cada fibra depende de su posición respecto al eje neutro.

3. Cálculo de esfuerzos:

- A partir de las deformaciones, se calculan los esfuerzos en cada fibra utilizando las relaciones constitutivas de los materiales.

4. Equilibrio de fuerzas y momentos:

- Los esfuerzos obtenidos se integran en todas las fibras para determinar las fuerzas internas, incluyendo el esfuerzo normal y el momento flector.
- Se aplican condiciones de equilibrio estático para determinar la posición del eje neutro y las deformaciones compatibles.

5. Generación de diagramas:

- Se generan los diagramas de interacción ($N-M$) y los diagramas de momento-curvatura ($M-c$) al variar las condiciones de carga y posición del eje neutro.

Una vez construidos los diagramas, se compararon resultados numéricos obtenidos con diferentes niveles de discretización para analizar el efecto del refinamiento de malla en los diagramas resultantes, adicionalmente los resultados obtenidos fueron comparados con los de un software comercial con el fin de verificar la precisión y confiabilidad del modelo implementado. Finalmente se evaluó el impacto de variables significativas en la resistencia y ductilidad de la sección.

Formulación del modelo

Hipótesis generales y variable de control

El análisis de los diagramas de flexo-compresión biaxial y momento-curvatura se realiza mediante un modelo numérico basado en el método de fibras, bajo las siguientes hipótesis:

1. Se adopta la hipótesis de secciones planas que permanecen planas.
2. Se considera adherencia perfecta entre el acero de refuerzo y el concreto.
3. El comportamiento del material es no lineal, gobernado por modelos constitutivos uniaxiales.
4. No se considera la inestabilidad global ni efectos de segundo orden.
5. No se modela la ruptura del acero, permitiendo grandes deformaciones post-fluencia.

La variable de control del problema es la deformación unitaria extrema del concreto en compresión, denominada como ϵ_c , la cual se incrementa de forma monótona. Adicionalmente, la curvatura κ se obtiene de manera implícita a partir del diagrama de deformaciones de la sección.

Campo de deformaciones y equilibrio seccional

El perfil de deformaciones unitarias sigue la siguiente ecuación.

$$m = \frac{ecc}{c}$$

$$b = ecc$$

$$x = -my + b$$

Donde ecc es la deformación unitaria y c la distancia al eje neutro desde una posición fija,

La tensión en cada fibra se obtiene a partir del modelo constitutivo correspondiente:

$$\sigma_i = f(\varepsilon_i)$$

El equilibrio seccional se impone mediante las siguientes ecuaciones no lineales:

$$\sum_{i=1}^n \sigma_i A_i = P$$

$$\sum_{i=1}^n \sigma_i A_i y_i = M_x$$

$$\sum_{i=1}^n \sigma_i A_i x_i = M_y$$

donde P , M_x y M_y corresponden a la fuerza axial y momentos resistentes de la sección.

Resolución del problema no lineal

El sistema de ecuaciones no lineales se resuelve de manera iterativa para cada valor impuesto de . Para cada incremento:

1. Se asume una posición inicial del eje neutro.
2. Se calculan las deformaciones de todas las fibras.
3. Se obtienen las tensiones mediante los modelos constitutivos.
4. Se evalúa el equilibrio axial.
5. Se ajusta la posición del eje neutro hasta satisfacer la condición de equilibrio con una tolerancia predefinida.

Este procedimiento permite construir los diagramas de interacción $P-M_x-M_y$ y los diagramas momento-curvatura.

Concreto no confinado y confinado (Mander et al.)

El comportamiento del concreto se modela mediante el modelo propuesto por Mander et al., tanto para concreto confinado como no confinado. La relación tensión-deformación se define como:

$$\sigma_c = \frac{f'_{cc} r \varepsilon_c}{r - 1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}}\right)^r}$$

donde:

- f'_{cc} es la resistencia a compresión del concreto confinado,
- ε_{cc} es la deformación correspondiente a f'_{cc} ,
- r es un parámetro dependiente del confinamiento.

El parámetro f'_{cc} se obtiene en función del nivel de confinamiento lateral f_l , el cual se varía paramétricamente para evaluar su influencia en la resistencia y ductilidad de la sección. De igual manera, la resistencia del concreto f'_c se considera como un parámetro variable dentro del estudio.

Acero de refuerzo (Park)

El acero de refuerzo se modela mediante el modelo propuesto por Park, considerando un comportamiento elasto-plástico con endurecimiento cinemático:

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s, & |\varepsilon_s| \leq \varepsilon_y \\ f_y + E_{sh}(\varepsilon_s - \varepsilon_y), & |\varepsilon_s| > \varepsilon_y \end{cases}$$

donde:

- E_s es el módulo de elasticidad del acero,
- $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ es la tensión de fluencia adoptada,
- $\varepsilon_y = f_y/E_s$
- E_{sh} es el módulo post-fluencia.

El módulo post-fluencia E_{sh} se adopta siguiendo la tendencia propuesta por Park, sin considerar la ruptura del acero, permitiendo evaluar grandes deformaciones en el régimen plástico.

Parámetros del estudio paramétrico

El estudio considera la variación de los siguientes parámetros:

- deformación máxima del concreto ε_c ,
- resistencia del concreto f'_c ,
- nivel de confinamiento,
- cuantía y disposición del acero.

Estos parámetros permiten evaluar su influencia en la resistencia axial, capacidad flexional y ductilidad de las secciones analizadas.

Resultados y discusión

a. Implementación computacional del diagrama de flexocompresión y de momento curvatura mediante el método de fibras

La implementación del modelo computacional tiene como objetivo el desarrollo de los diagramas de flexocompresión y momento curvatura.

Con el objetivo de proporcionar un código limpio y comprensible para el usuario, se desarrolló diversas funciones que gestionan cada parte del proceso del cálculo. Esta segregación facilita la legibilidad del código y permite una mejor organización de los procesos separándolos por material. Adicionalmente, esta estructura contribuye a la utilización del código y facilita su mantenimiento para futuras actualizaciones. Las **Figuras 1,2,3,4,5**, describen el modelo computacional desarrollado en MATLAB que representan el proceso de generación de los diagramas

de flexocompresión y momento-curvatura mediante el método de fibras.

b. Influencia del número de fibras en el método numérico

En este apartado se analiza cómo la discretización de la sección influye en la precisión de los resultados obtenidos mediante el método empleado. Dado que el método de fibras la ser un método numérico, depende del nivel discretización de la sección transversal, fue fundamental explorar la sensibilidad de los resultados frente a variaciones del tamaño de fibras con el objetivo de encontrar convergencia en el método propuesto, en otras palabras, se busca el tamaño de fibras para el cual los resultados obtenidos tienden a estabilizarse y aproximarse a un valor específico sin grandes variaciones.

En las **Figuras 7 y 8** se presentan los resultados obtenidos para una sección de hormigón armado con

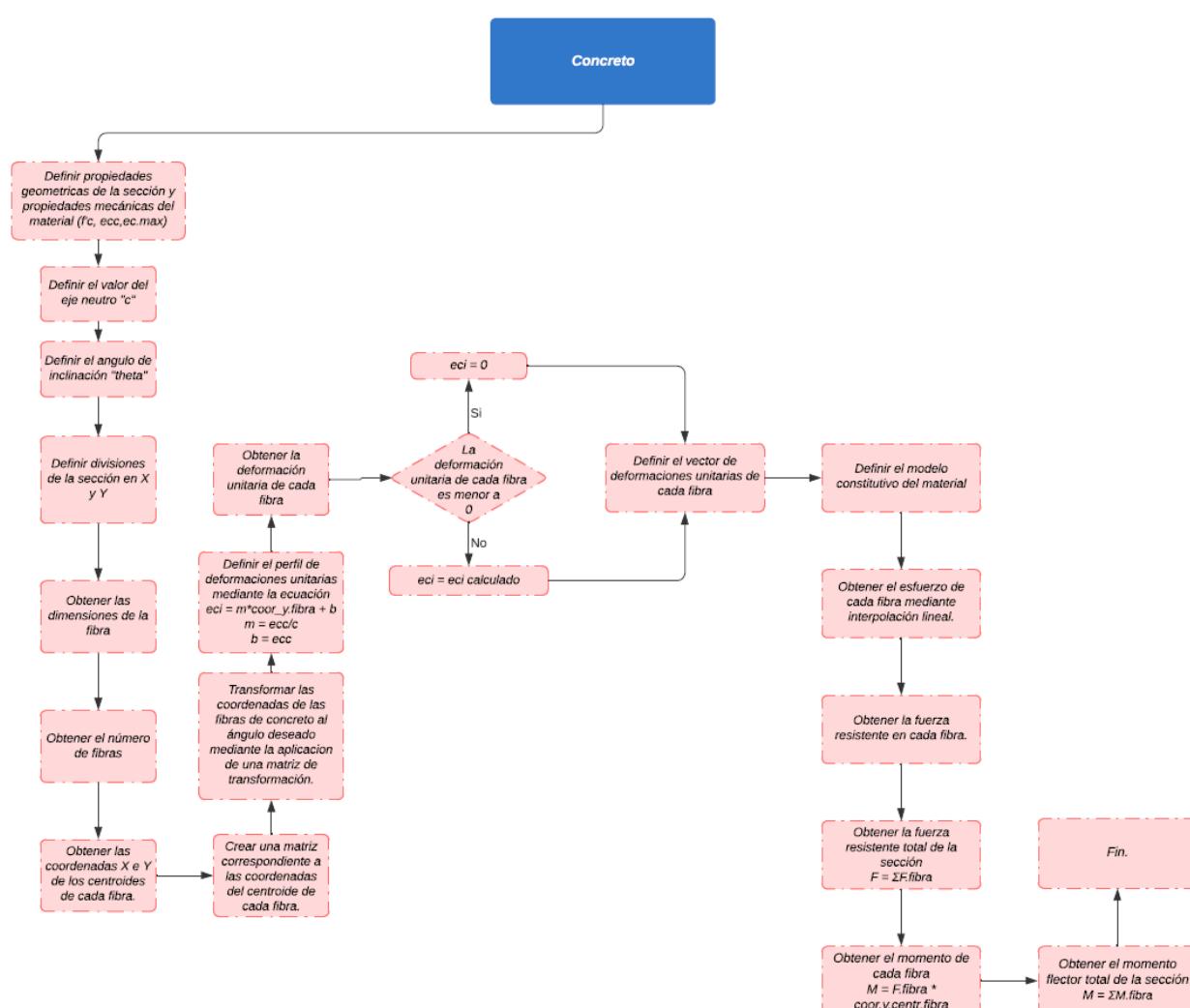


Figura 1. Flujograma Concreto.

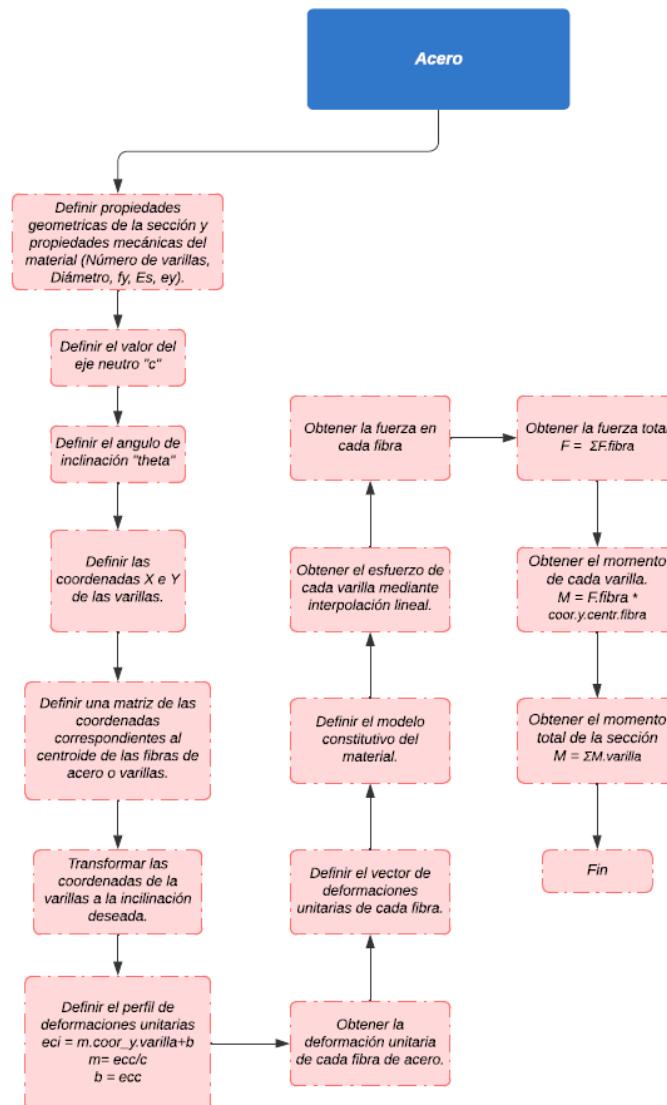


Figura 2. Flujograma Acero.

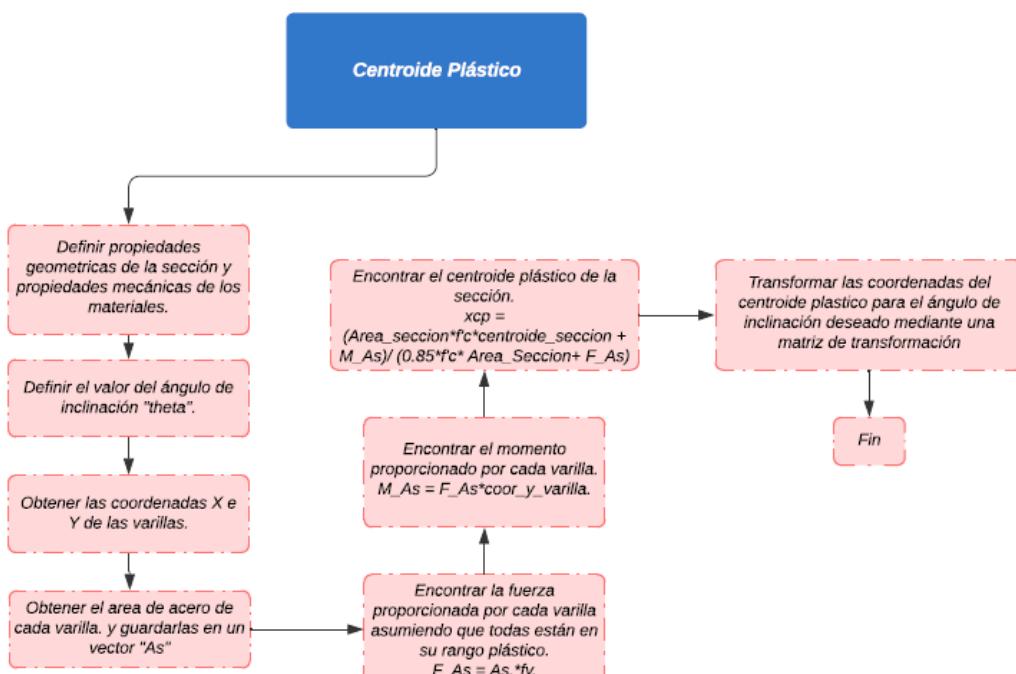
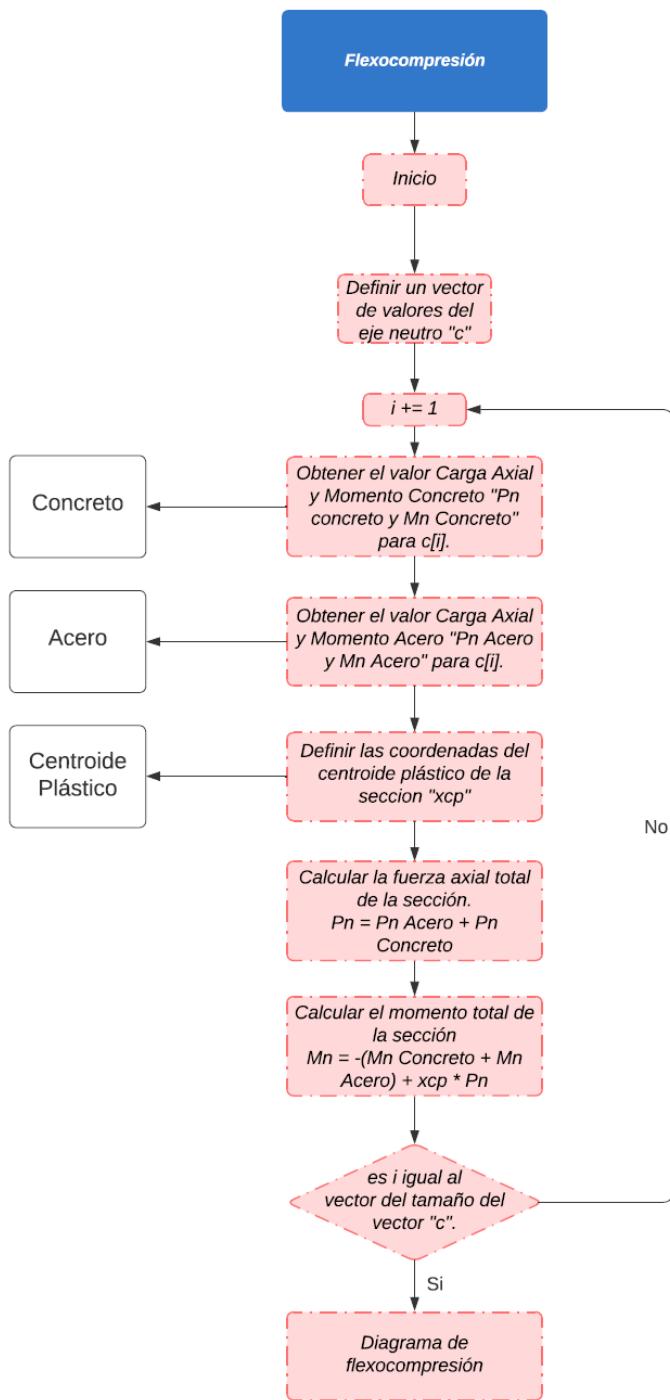
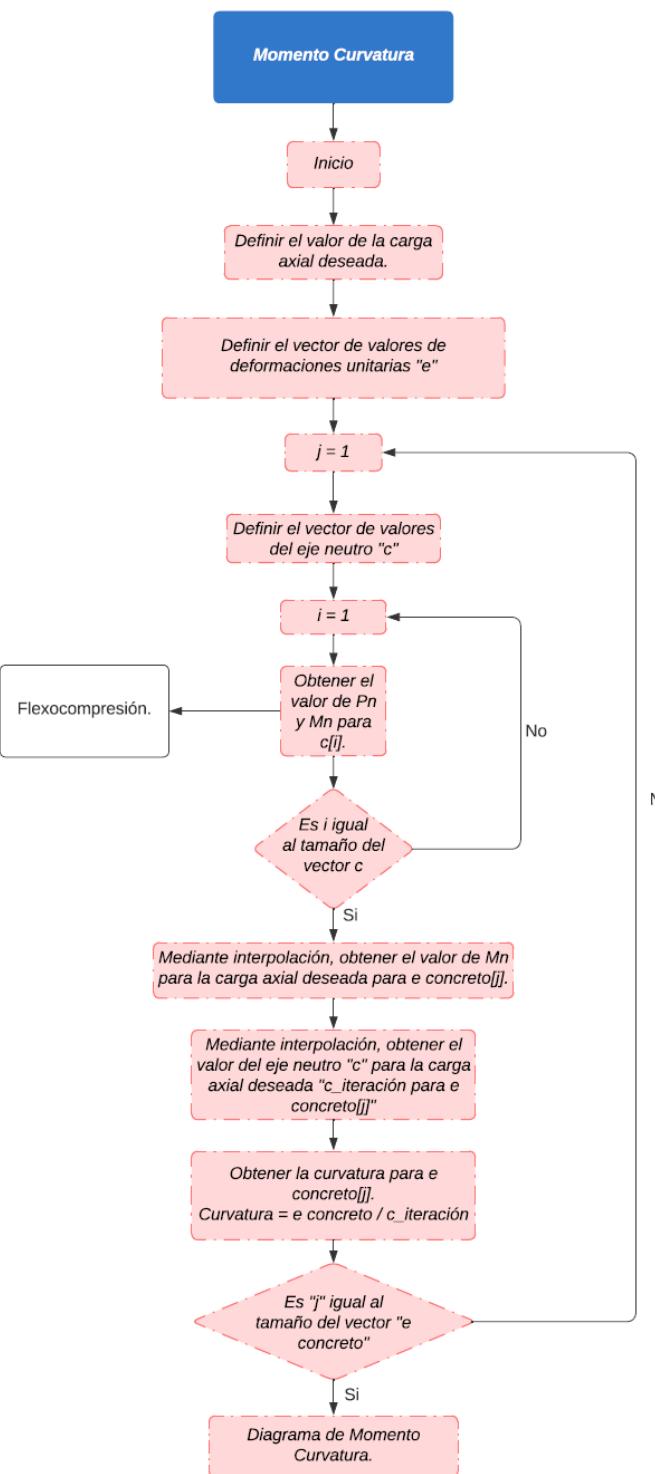


Figura 3. Flujograma Centroide Plástico.

**Figura 4.** Flujograma Flexocompresión.

el objetivo de evaluar la convergencia del método propuesto y analizar los patrones-observados

En las **Figuras 7 y 8** se observa que, para el diagrama de flexocompresión se alcanzó convergencia con fibras de un tamaño menor o igual al 1% del área de la sección, por otro lado, en la **Figura 8** para el diagrama de momento curvatura se alcanzó con fibras de un tamaño menor o igual al 0.25% del área de la sección.

**Figura 5.** Flujograma Momento Curvatura.

c. Comparación del modelo propuesto con Software Comercial (CSiCol V 11.0)

En esta sección se buscó comparar los resultados obtenidos con los resultados proporcionados por un software comercial como CSiCol.

El modelo computacional implementado en MATLAB se basa en los mismos principios constitutivos

que los resultados obtenidos por CSiCol, sin embargo, no se logra replicar exactamente los resultados del software comercial, tal como se puede apreciar en las **Figuras 9 y 10**, debido a varias diferencias en los enfoques numéricos y ciertas suposiciones realizadas. Estas diferencias pueden atribuirse a los siguientes factores:

1. Diferencias en la resolución numérica: CSiCol puede utilizar métodos numéricos distintos para el detallado o mallado de la sección que pueden capturar de manera diferente la distribución de esfuerzos. En el modelo presentado, aunque se ha ajustado la cantidad de fibras y se ha buscado la convergencia numérica, existen limitaciones a la precisión de la discretización y la forma de esta, puesto que se ha discretizado la sección de

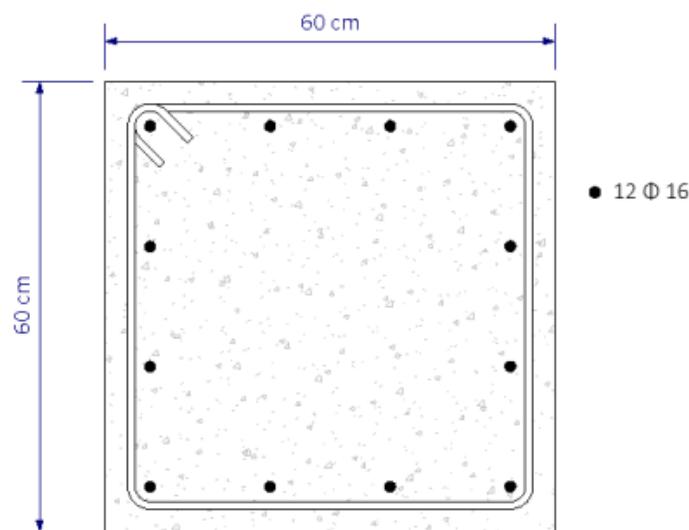


Figura 6. Sección modelo.

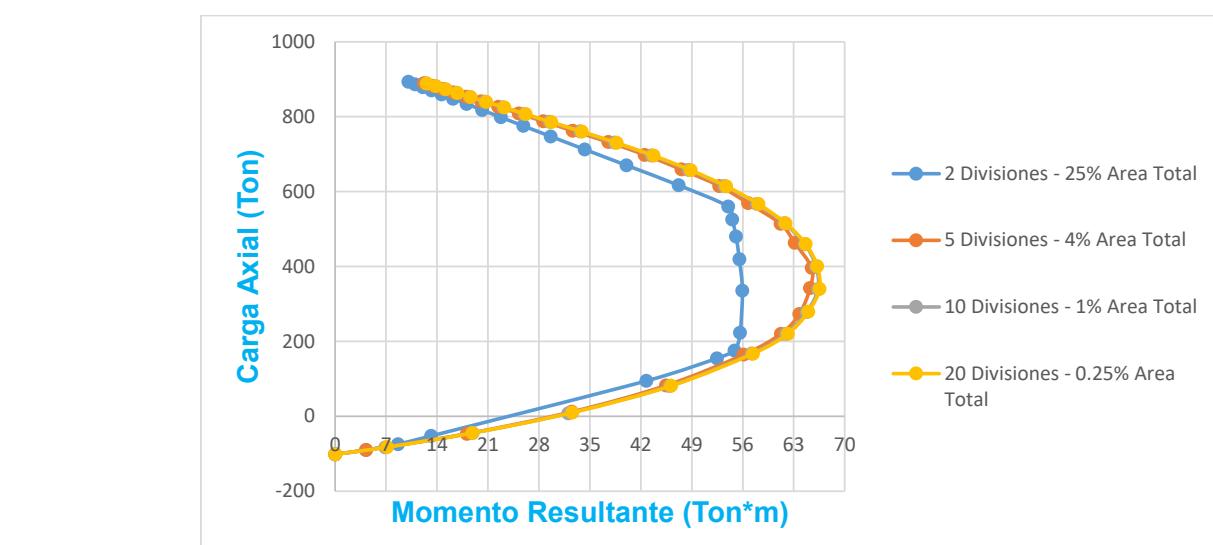
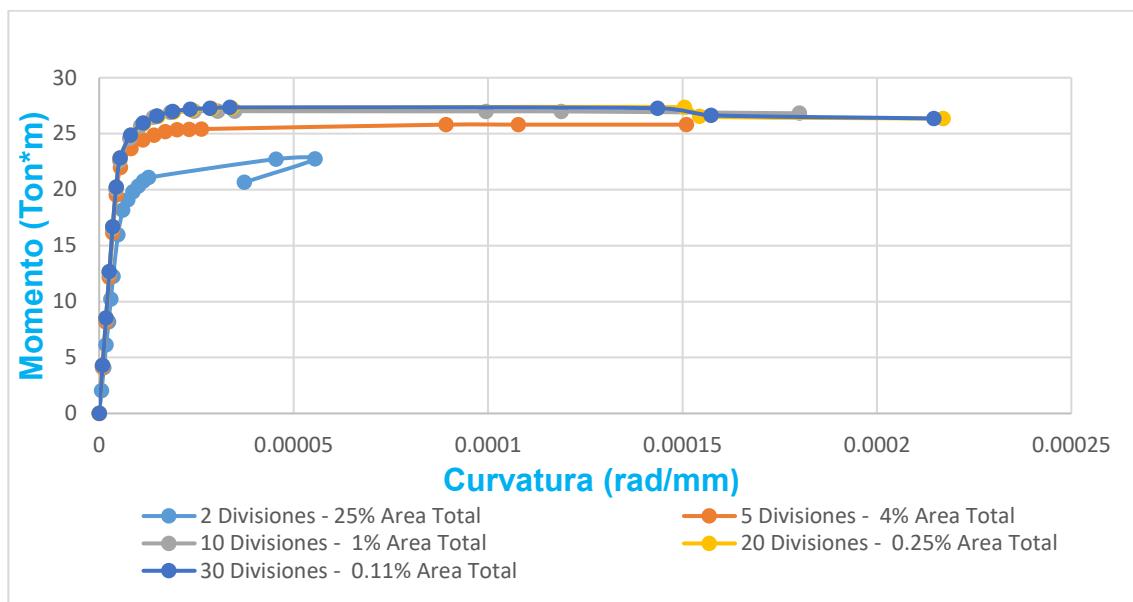
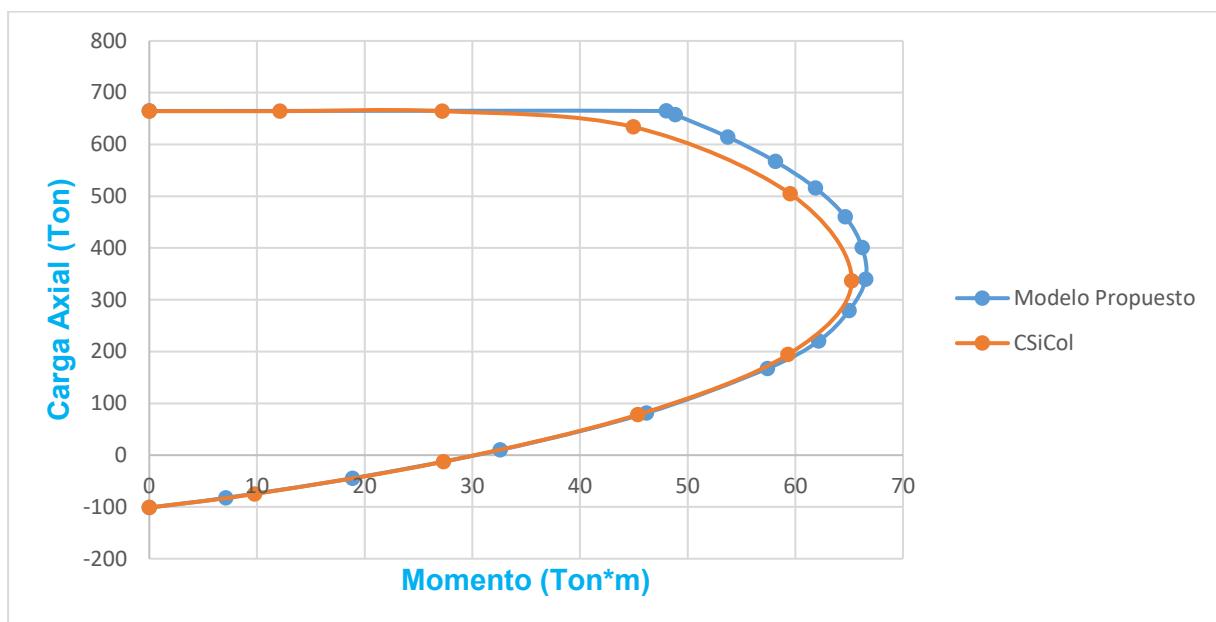


Figura 7. Diagrama de Interacción para diferente tamaño de fibras.

Fuente: Elaboración propia.

manera igual únicamente considerando el tamaño de la fibra lo que puede conllevar a resultados diferentes.

2. Limitaciones de Software y Hardware: CSiCol puede optimizar el rendimiento computacional mediante algoritmos avanzados, mientras que el modelo implementado tiene restricciones en los recursos computacionales disponibles lo que podría influir en la precisión y eficiencia del análisis.
3. Parámetros de convergencia: CSiCol podría tener ajustes de convergencia más estrictos en un refinamiento adicional en la curva que influyen en la forma de las curvas de flexocompresión y momento curvatura.
4. Modelación Constitutiva: Aunque ambos modelos comparten los mismos modelos constitutivos (Mander para concreto y Park para acero) la forma en que cada algoritmo los implementa puede diferir, especialmente cuando los materiales se comportan en el rango plástico. CSiCol podría aplicar ajustes adicionales en el comportamiento constitutivo plástico que están fuera del alcance de este estudio.
5. Equilibrio de la sección: En el modelo implementado los esfuerzos en cada fibra se obtienen mediante una interpolación lineal basada en los modelos constitutivos en función de la deformación de cada fibra, y se realiza un procedimiento similar para obtener los valores de momento y curvatura para la carga axial deseada. EN cambio, CSiCol podría realizar un análisis más preciso y detallado que una interpolación lineal para el cálculo de estos valores.

**Figura 8.** Diagrama de Momento-Curvatura para diferente tamaño de fibras.**Fuente:** Elaboración propia.**Figura 9.** Comparación Diagrama de Interacción modelo propuesto vs software comercial.**Fuente:** Elaboración propia.

En resumen, si bien ambos modelos siguen los mismos principios teóricos, la implementación práctica del modelo propuesto puede dar desviaciones respecto al modelo de referencia utilizado (CSiCol). Así, por ejemplo, en la sección propuesta se tiene resultados más grandes en el diagrama de flexo compresión y resultados más conservadores en el diagrama de momento curvatura.

No obstante, como se mencionó anteriormente lo que se busca es analizar el comportamiento

y tendencia de secciones bajo distintos escenarios, más que replicar con exactitud los resultados de algún software comercial. Este modelo facilita una comprensión profunda del proceso de cálculo y permite analizar el impacto de cada variable en el comportamiento de la sección, ofreciendo así una base educativa y exploratoria que completa el uso del software comercial.

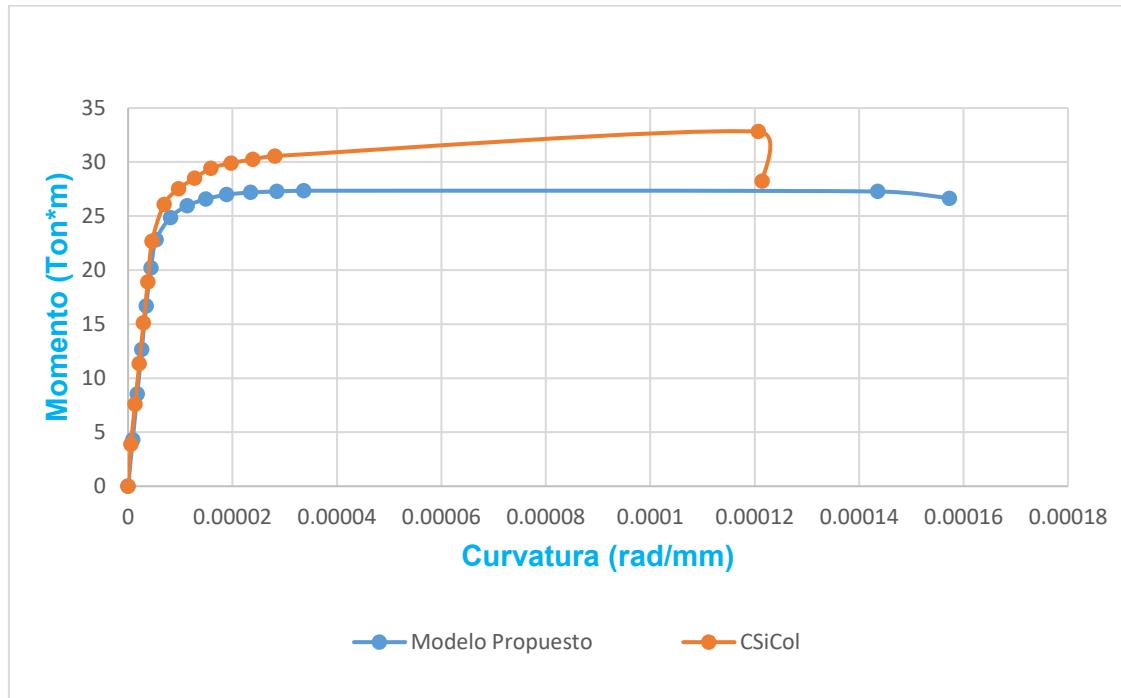


Figura 10. Comparación Diagrama de Momento-Curvatura modelo propuesto vs software comercial.

Fuente: Elaboración propia.

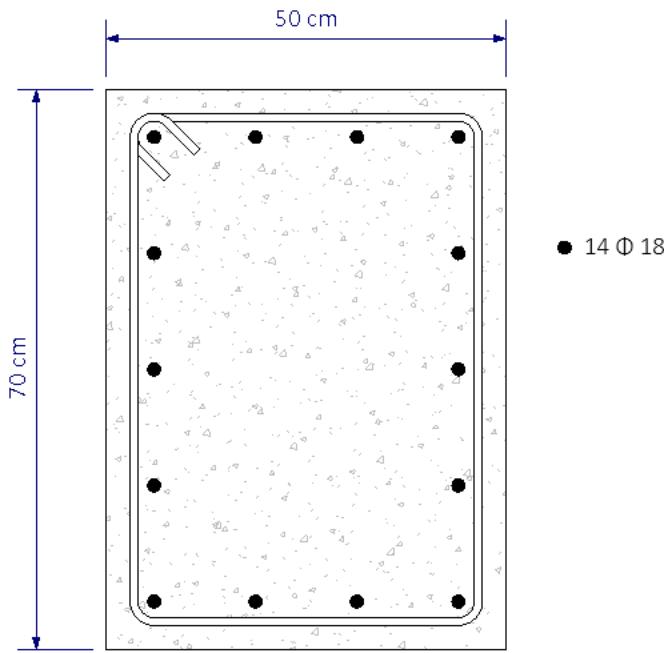


Figura 11. Sección de Análisis.

d. Influencia de variables críticas en los diagramas de flexocompresión y momento curvatura de secciones de concreto armado

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al analizar la influencia de variables clave en el comportamiento de secciones de concreto armado. Entre estas variables se incluyen el confinamiento de

la sección, la separación de estribos, la cuantía de acero, la deformación máxima del concreto además del tipo de modelo constitutivo empleado. Se analiza como estas variables afectan la capacidad a flexión, compresión y ductilidad. La **Figura 11** presenta la sección de estudio corresponde a una sección típica de concreto armado.

d.1. Influencia del confinamiento en el comportamiento de la sección

En este apartado se busca analizar la influencia del confinamiento en los diagramas de flexocompresión y momento-curvatura descritos en las **Figuras 13 y 14**. En la **Figura 12** se ilustra el diferente confinamiento de la sección.

En la **Figura 13** se aprecia que, la resistencia a flexocompresión obtenida considerando modelos tradicionales (Whitney y elastoplástico) es menor en la zona de tensión pura y en la zona mayormente controlada por compresión a la obtenida considerando modelos más avanzados. Adicionalmente se observa que, en la zona mayormente controlada por tensión, se tiene una resistencia similar.

Por otro lado, el confinamiento de la sección no presenta un gran aumento en la capacidad a flexo compresión de la sección puesto que no existe un cambio considerable entre los modelos que consideran confinamiento total y el modelo que considera concreto no confinado.

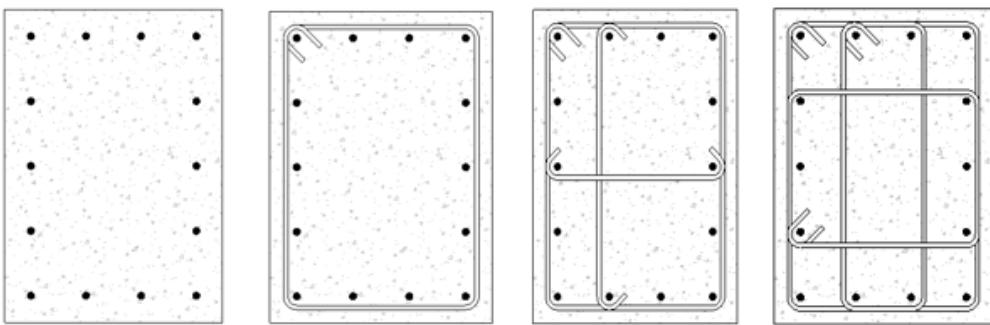


Figura 12. Diferente Confinamiento de la Sección.

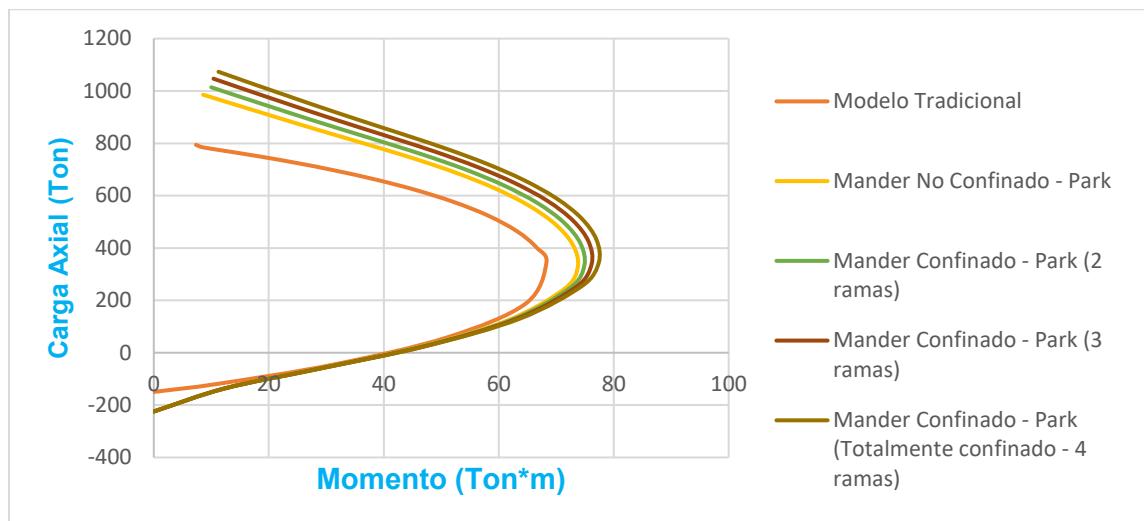


Figura 13. Diagrama de Interacción considerando diferente Confinamiento de la Sección.

Fuente: Elaboración propia.

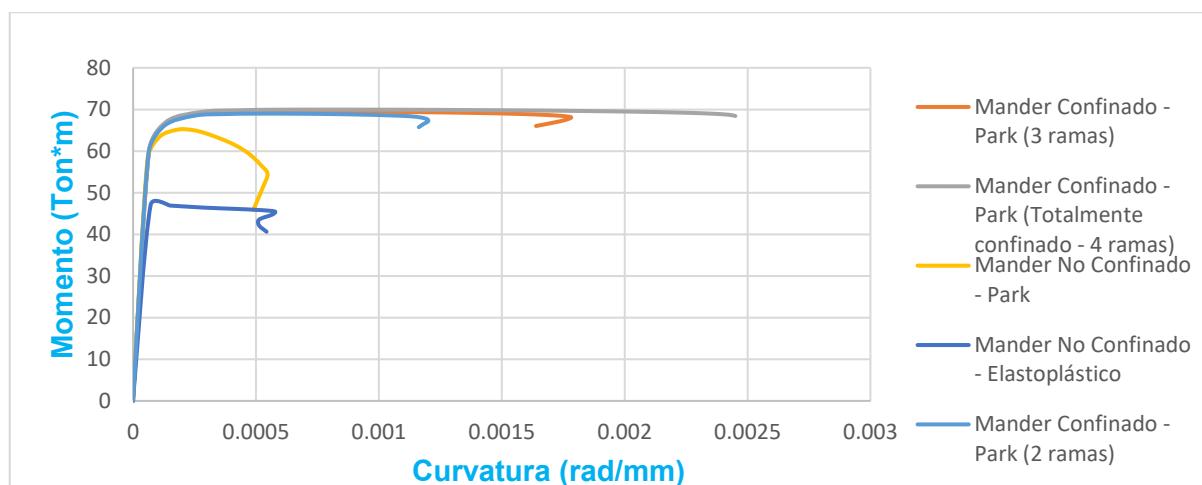


Figura 14. Diagrama de Momento-Curvatura considerando diferente Confinamiento de la Sección.

Fuente: Elaboración propia.

Al observar las curvas azul y amarilla en la **Figura 14**, se evidencia que ambas se obtuvieron considerando el mismo modelo constitutivo para el concreto. Sin embargo, al emplear un modelo más avanzado para el acero (Park), los resultados muestran una mayor resistencia en comparación con los obtenidos utilizando un modelo más simple como el elastoplástico del acero. Esta diferencia se debe a que el modelo de Park incorpora el endurecimiento del acero en el rango plástico, algo que el modelo elastoplástico no contempla.

Adicionalmente en la misma Figura, se observa que el confinamiento de la sección no tiene un impacto significativo en su resistencia, sin embargo, su ductilidad aumenta considerablemente a medida que el confinamiento de la sección incrementa.

d.2. Influencia de la separación de estribos en el comportamiento de la sección

En este apartado se busca evaluar la influencia de la separación de los estribos en los diagramas de flexocompresión y momento-curvatura descritas en las **Figuras 15 y 16**.

En la **Figura 15** se observa que la capacidad a flexocompresión en la zona mayormente controlada por compresión de la sección se ve ligeramente afectada por el espaciamiento de los estribos, sin embargo, su resistencia no aumenta significativamente. Por otro lado, el comportamiento a flexocompresión proporcionado por modelos constitutivos tradicionales considera resultados más conservadores que modelos avanzados, incluso considerando una amplia separación entre estribos.

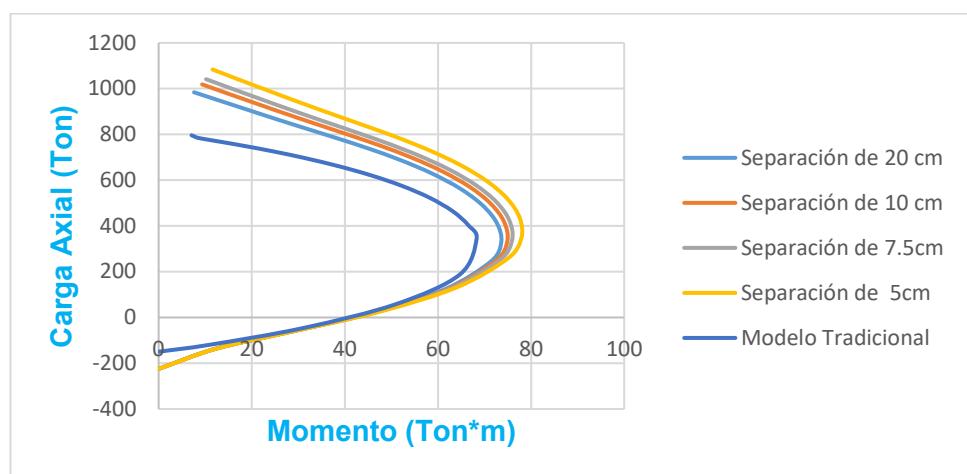


Figura 15. Diagrama de Interacción considerando diferente separación de estribos.

Fuente: Elaboración propia.

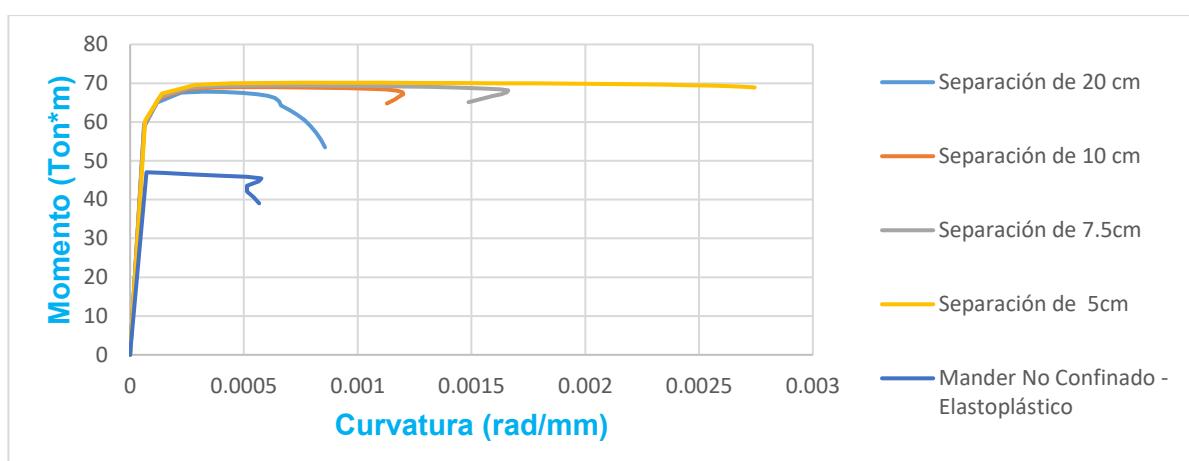


Figura 16. Diagrama de Momento-Curvatura considerando diferente separación de estribos.

Fuente: Elaboración propia.

La **Figura 16** ilustra que la resistencia de la sección no se ve considerablemente aumentada conforme exista menor separación entre estribos, sin embargo, su ductilidad aumenta considerablemente mientras exista menor separación entre estribos. Por otro lado, los resultados obtenidos al considerar el modelo elastoplástico para el acero y el modelo no confinado para el hormigón resultan ser más conservadores que aquellos obtenidos incluso al emplear un modelo más avanzado con una amplia separación entre estribos.

d.3. Influencia de la cuantía de acero

A medida que la cuantía de acero incrementa, aumenta la capacidad a flexocompresión de la sección,

especialmente en la zona mayormente controlada por compresión donde existe mayor diferencia de resistencia (**Figura 17**).

En el diagrama de momento-curvatura (**Figura 18**) se observa que, la resistencia de la sección aumenta conforme la cuantía de acero aumenta, sin embargo, su ductilidad se reduce, es decir que a mayor cuantía de hacer la sección tiende a fallas frágiles.

d.4. Influencia de la deformación unitaria máxima del concreto

La deformación unitaria máxima corresponde a la deformación en la cual el concreto se fractura, teóricamente se ha adoptado este valor igual a 0.003.

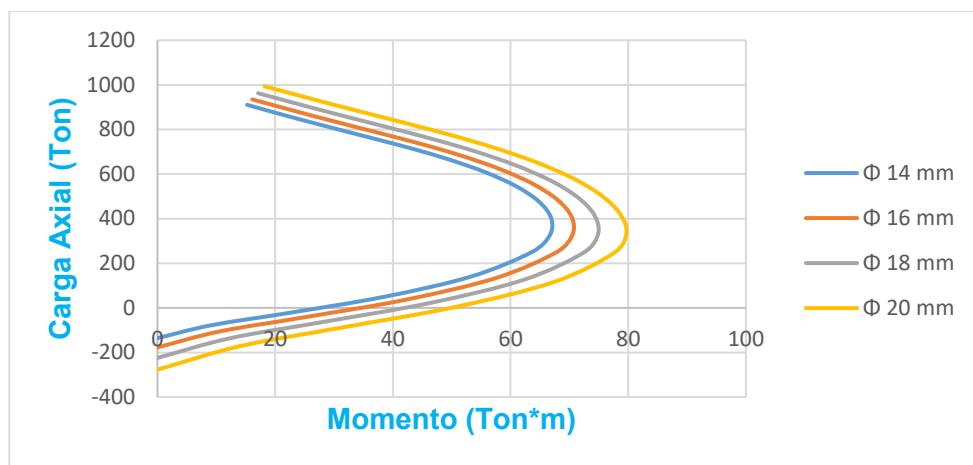


Figura 17. Diagrama de Interacción considerando diferente cuantía de acero.

Fuente: Elaboración propia.

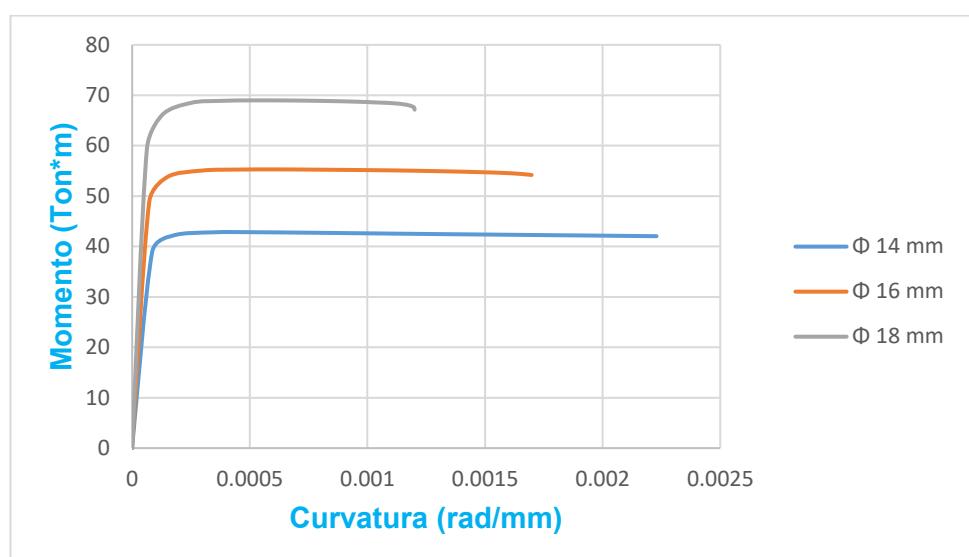


Figura 18. Diagrama de Momento-Curvatura considerando diferente cuantía de acero.

Fuente: Elaboración propia.

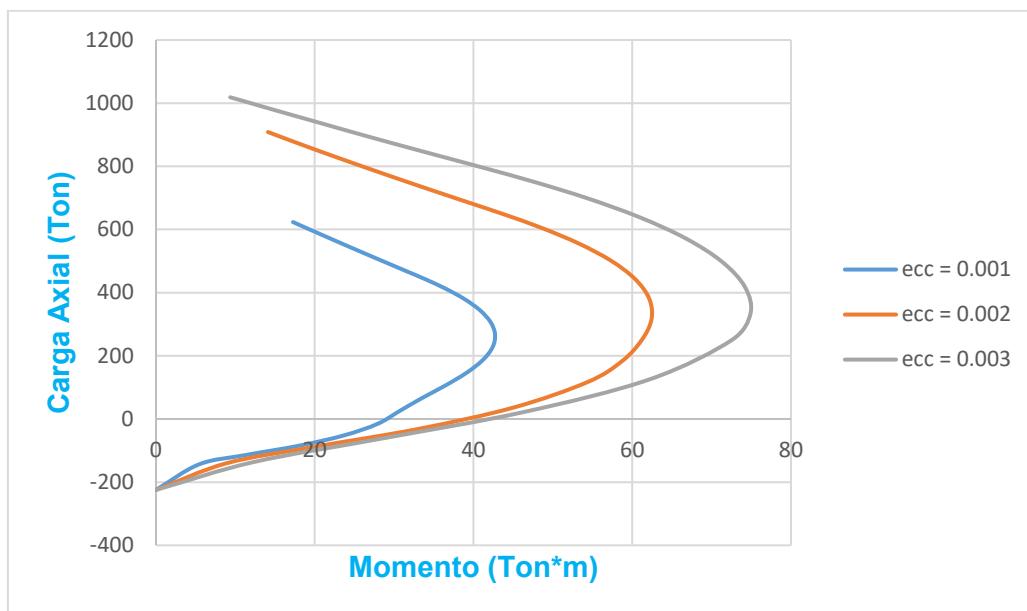


Figura 19. Diagrama de Interacción considerando diferente deformación unitaria máxima del concreto.

Fuente: Elaboración propia.

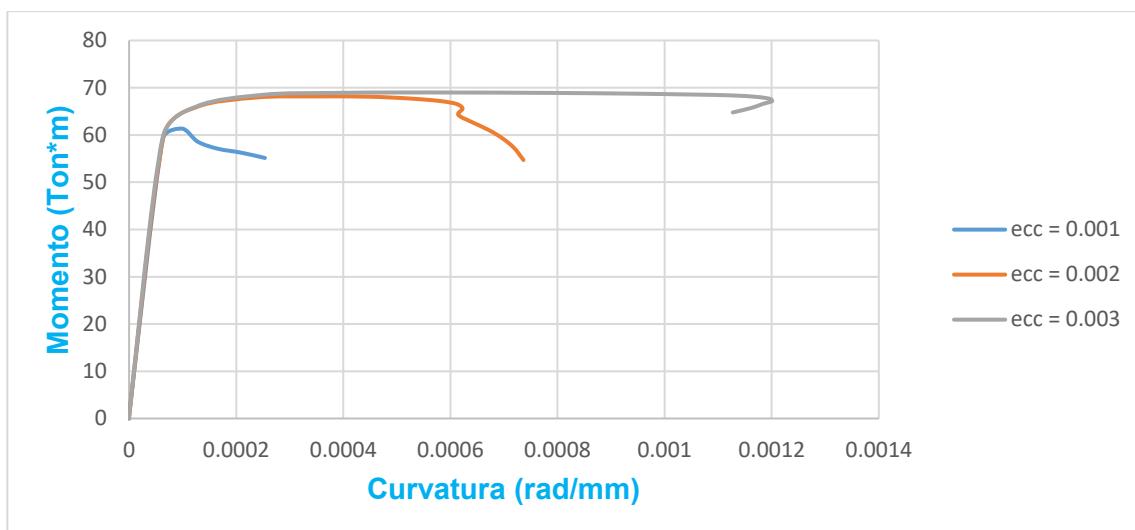


Figura 20. Diagrama de Momento-Curvatura considerando diferente deformación unitaria máxima del concreto.

Fuente: Elaboración propia.

En esta sección se busca analizar el comportamiento de la sección cuando esta deformación es igual a otros valores.

La resistencia a flexocompresión de la sección en la zona mayormente controlada por tensión no presenta una variación significativa con respecto al valor de la deformación unitaria máxima del concreto (**Figura 19**), sin embargo, en la zona mayormente controlada por compresión, este valor tiene una influencia considerable. A medida que aumenta la deformación unitaria máxima del concreto, se observa un incremento en la capacidad de flexocompresión.

En la **Figura 20** se observa que, el valor de la deformación máxima del concreto, además de influenciar en la resistencia de la sección también tiene influencia en la ductilidad de la misma. A medida que aumenta la deformación unitaria máxima del concreto, se observa un incremento en la capacidad de deformación de la sección.

Conclusiones

El uso de un modelo computacional brinda la capacidad de llevar a cabo una amplia gama de cálculos repetitivos de manera muy eficiente. Este enfoque

permite automatizar tareas que normalmente requerían mucho tiempo y recursos humanos.

Al aprovechar la potencia de procesamiento de un modelo computacional, se pueden lograr resultados rápidos y precisos, lo que aumenta la productividad en los procesos. Además, este enfoque ofrece la ventaja de minimizar los errores humanos, puesto que, el modelo sigue instrucciones programadas y actúa de manera coherente en cada iteración.

Modelos constitutivos de materiales avanzados como los propuestos por Mander para el concreto y Park para el acero reflejan de mejor manera el comportamiento real de una sección de concreto armado, especialmente cuando los materiales están trabajando en su rango plástico, puesto que considera variables existentes en la realidad como el confinamiento de la sección, la separación del confinamiento y el endurecimiento del acero en su rango plástico. En contraste, modelos simplificados como el de Whitney y el modelo elastoplástico son incapaces de evaluar el impacto de estas variables debido a las suposiciones y aproximaciones que emplean con el fin de permitir cálculos más simples y rápidos.

El método de fibras al ser un método numérico depende de la discretización que se le dé a la sección, sin embargo, con fibras con un tamaño menor o igual al 1% del área total de la sección, el método logra converger, es decir, la diferencia de resultados no es significativa.

El confinamiento y su espaciamiento no presentan un aumento significativo en la resistencia a flexocompresión de una sección de concreto armado, sin embargo, evidencian un incremento considerable en la capacidad de deformación o ductilidad de la sección. Evaluar este comportamiento es esencial para condiciones en las cuales los materiales deben trabajar en su rango plástico, como bajo la acción de cargas dinámicas.

La cuantía de acero es un parámetro fundamental tanto en la capacidad a flexocompresión como en la ductilidad de la sección. Un mayor contenido de acero incrementa la resistencia de la sección, pero disminuye su ductilidad.

La deformación unitaria máxima del concreto es un parámetro fundamental en la caracterización de la flexocompresión y ductilidad de una sección de hormigón armado. Un mayor valor de la deformación unitaria máxima incrementa tanto la resistencia como la ductilidad de la sección.

Referencias

- Briones, C. D. H. (2020). *Optimización de edificaciones empleando vigas de concreto de sección hueca* (Tesis de pregrado). Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Perú.
- Mander, J. B., Priestley, J. N., & Park, R. (1998). Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete (1.a ed.).
- Marín, J.A., (2009). *Análisis del método de las fibras para la revisión y diseño de elementos de hormigón armado* (Tesis de pregrado) Universidad de Antioquia, Colombia.
- Muñoz, Diego. (2020). *Diagramas de interacción de columnas circulares mediante el software DIIN*. (Tesis de post grado). Universidad Autónoma de Puebla, México.
- Luccioni, B. (1993). *Formulación de un Modelo Constitutivo para materiales* (Tesis de postgrado). Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.
- Medina, C. (2015). Desempeño de secciones de hormigón armado a flexo-compresión mediante el análisis de la relación momento-curvatura. *Revista Politécnica*, 35(3). Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/343797975>
- Mora, D., & Aguiar, R. (2018). Modelación de Diagrama Momento-Curvatura y Momento-Rotación en Modelación de diagrama Momento-Curvatura y Momento-Rotación en Secciones de Acero Estructural. *Ciencia*, 17(1), 100 – 122 p <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/ciencia/article/view/514>